

FMCW 生命信号检测技术在老年健康住宅中的应用

陈宇翔

义乌工商职业技术学院 浙江 义乌 322000

【摘要】：现阶段下，我国人口老龄化问题日益严重，如何更好的解决老年人的居家监护问题成为社会的主要关注点之一。本文从我国的现状出发，通过对几种雷达技术样本的对比分析，提出采用 FMCW 雷达技术来监测老龄人生命信号参数，并指出通过网络技术使之与远程医疗中心相连的方式，让老年人在居家的情况下，各项生理指标也能得到实时监护，以此来推动老年健康住宅的发展。

【关键词】：FMCW；生命信号；检测技术；老年健康住宅

Application of FMCW Life Signal Detection Technology in Elderly Health Homes

Yuxiang Chen

Yiwu Industrial and Commercial Vocational and Technical College, Zhejiang Yiwu 322000

Abstract: At the present stage, the aging problem of China's population is becoming increasingly serious. How to better solve the problem of home care of the elderly has become one of the main concerns of the society. Based on the current situation of Our country, this paper puts forward the application of FMCW radar technology to monitor the life signal parameters of elderly people by comparing and analyzing several radar technology samples. It is also pointed out that by connecting it with telemedicine center through network technology, the physiological indicators of the elderly can be monitored in real time even when they are at home, so as to promote the development of health housing for the elderly.

Keywords: FMCW; life signal; detection technology; elderly health house

1 需求分析

2019年11月8日，经李克强总理签批，国务院印发了《国务院关于开展第七次全国人口普查的通知》，决定于2020年开展第七次全国人口普查，普查标准时点为2020年11月1日零时。

2021年5月11日，国家统计局发布了第七次人口普查的结果，截止2020年，我国的人口总体规模达到了14.1亿人，与2010年的第六次全国人口普查相比增加了7200余万人，年平均增长率为0.53%。可见我国人口的增长速度正在持续放缓，人口高速增长的时期已经过去。

从人口结构看，本次人口普查的结果显示，截止2020年，我国60岁及以上的老年人口总量已经达到2.64亿人，占全国人口的18.7%，比2010年第六次全国人口普查的结果提升了5.4%，与2000年时相比提升了8.4%。由此可见2010年至2020年期间的老龄化老口比例增长率要大大的超过2000至2010年期间，我国的人口老龄化问题正面临着极其严峻的考验^[1]。

而根据国家统计局以及中国社会科学院的预测，在未来的十年中，我国的老龄人口比例还将继续攀升并且进入增长的“快车道”直至本世纪中叶。因此积极应对人口老龄化问题成为我国社会现阶段下的迫切需求，党的十九届五中全会将此上升至国家战略的高度。

发展老年人的居家监护技术与手段是应对人口老龄化问

题的重要内容。据统计，在所有的养老模式中，我国96%的老年人选择居家养老模式，而且随着社会的快速发展变迁，许多老人都只能独自生活，子女往往难以及时照料老人。所以利用新的科学技术手段对居家老年人进行更全面的监护是现代社会的重要需求之一。2021年10月20日，我国工业和信息化部、民政部、国家卫生健康委三部门便联合印发了《智慧健康养老产业发展行动计划（2021-2025年）》，强调要深入实施健康中国战略和积极应对人口老龄化国家战略，大力推动发展智慧健康养老技术，特别是老年人居家行为监测、生理检测、室内外高精度定位、健康数据分析等方面的关键技术发展，以此来满足人民群众日益增长的健康及养老需求。

2 基本原理

总体而言，生命信号检测技术主要分为接触式和非接触式两类，其中接触式检测技术需要被测量者穿戴某种特定的设备进行测量，特定的人群可能会有一定的不适应感，所以接触式的测量方法使用范围并不广泛，通常在医院等特定范围内使用。本文中所研究的对象为非接触式生命信号检测技术^[2]。

采用雷达技术进行生命信号检测是近年来最主流的非接触式检测技术之一，其基本原理是通过解析因检测目标与雷达之间的相对运动而导致的回波信号中心频率的变化量而确定目标与雷达之间的相对距离与相对速度，即多普勒效应。1842年，奥地利物理学家、数学家克里斯琴·约翰·多普勒首次提出该理论，当检测目标与信号发射源之间距离增大时，回波信

号的中心频率会变低，相反距离减小时，中心频率会变高，而变化量则由目标与发射源之间的相对速度决定。

将多普勒效应原理应用与生命信号检测中，以检测雷达作为信号发射源，以被检测人的胸腔作为检测目标，而被检测人的呼吸和心跳都会引起其胸腔的规律运动，也就是信号发射源与检测目标之间发生了相对运动，并假设该相对运动的速度为 $v(t)$ ，则根据多普勒效应，可以得出回波信号的频移为：

$$f_d(t) = \frac{2f}{c}v(t) = \frac{2v(t)}{\lambda} \quad (1)$$

由此可得：

$$v(t) = \frac{1}{2} \lambda \cdot f_d(t) \quad (2)$$

其中 f_d 为得到的多普勒频移， f 为雷达发射信号的中心频率， λ 为雷达发射信号波长^[3]。

综上所述，当检测雷达发射波长为 λ 的信号至被检测人体胸腔后，再接收自被检测人体胸腔反射的回波，便可测得频移 f_d ，再根据上式便可得出被检测人的胸腔运动规律，所以雷达收到的回波就可以认为包含了人体胸腔运动的信息。而胸腔运动规律与人体呼吸和心跳频率相关，所以通过对回波的信号进行相应的处理和分析，就可以得到被检测人体对象的心跳、呼吸频率等生理参数。

3 技术对比分析

随着科学技术的发展，基于以上所述的基本原理，有众多不同类别的雷达技术先后问世，然而由于不同类别雷达的硬件结构以及分析算法不同，会导致生命信号的提取结果有所不同，相互之间存在一定的偏差。总体而言，连续波多普勒雷达（Continuous Wave Radar, 简称 CW 雷达），超宽带脉冲雷达（Ultra Wide Band Radar, 简称 UWB 雷达）以及调频连续波雷达（Frequency Modulated Continuous Wave Radar, 简称 FMCW 雷达）在非接触式生命信号检测系统中的应用较为广泛。本节中将以这三种雷达作为技术样本进行研究，分析其利弊。

超宽带技术虽然在 20 世纪初就已经出现，但是在早期该技术基本只应用于通信、军方与航天航空领域，直到 20 世纪 90 年代才开始将它应用到生命信号检测中。2002 年，美国联邦通信委员会（FCC）针对超宽带技术发布了定义与规范，即在 -10dB 处绝对带宽大于 0.5GHz，或者相对带宽超过 20% 的系统，如图 1 所示：

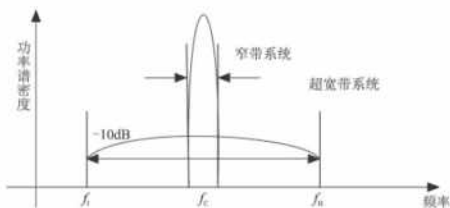


图 1 超宽带系统定义

UWB 雷达系统的原理如图 2 所示：

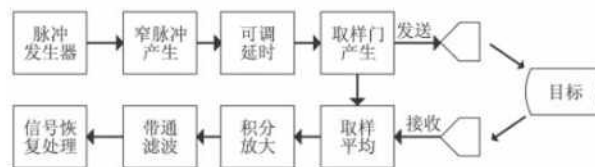


图 2 UWB 雷达系统原理图^[4]

通过雷达发射脉冲信号，信号经过目标反射回到接收器，再通过调整可延时器，使回波信号逐渐通过取样门，之后对信号进行积分放大、滤波等处理后，便可得到与目标相关的人体生命信号^[4]。

与其他几种雷达技术不同的是，UWB 雷达技术所采用的是极窄的脉冲信号，所以经过反射后的回波信号仍然是窄脉冲信号，这相比与其他技术所得到的正弦波回波信号有更好的可识别性，另外，由于窄脉冲所持续的时间很短，所以在目标物体的定位精度方面可以达到更好的效果，这使得近距离生命信号检测成为可能。同时，由于 UWB 技术所发射的信号频带极宽，频率也可以到 GHz 级，所以其信号有穿透力较强、抗干扰性较好的特点。其次，由于 UWB 雷达的信号接收端采用了取样门的方式，所以在硬件设计上可以取消信号发射端与接收端的隔离装置，使得硬件设计方面较为简便^[5]。

但正是因为 UWB 信号的宽度极宽，所以导致在实际生命信号的检测应用中如何选择合适的带宽与频率成为一个难题。当选择较低的频率时，将无法满足对人体生命信号检测的精度要求，会造成检测结果与实际偏差较大的问题，相反，当选择过高的频率时，由于高频信号的穿透性太强，会产生因信号穿透检测目标人体而使得反射信号较弱的问题。综合以上 UWB 雷达技术的优缺点，通常该技术更适合于在需穿透较多或者较厚障碍物进行生命信号探测的情况，例如地质灾害后的救援工作等。

CW 与 FMCW 雷达均是通过发射连续正弦波信号，再将发射波与接收到的回波的幅度、频率、相位等进行比较，从而得出被检测人体的生命信号参数。其中 CW 雷达是最早使用于人体生命信号检测的雷达技术，早在 20 世纪 70 年代就已经有学者开始研究该技术在人体生命信号检测方面的应用。

然而两者不同的是，CW 雷达所发射的信号为单频信号，所以在回波信号的处理过程中很难去除背景噪声的影响，即信号容易受到干扰，同理，该技术很难应用与多目标的检测系统。所以，在此基础上，发展出了调频连续波雷达技术，即 FMCW 雷达技术，并且得到了众多研究者的广泛应用。该技术不仅可以避免 CW 雷达技术中的干扰问题，以及多目标检测问题，同时具有 UWB 雷达技术的精度高、频带宽等优点，所以，通过对这三种技术样本的对比分析，在本文中采用 FWCW 雷达技术作为研究对象。

4 信号建模

FMCW 雷达的工作原理图如下:

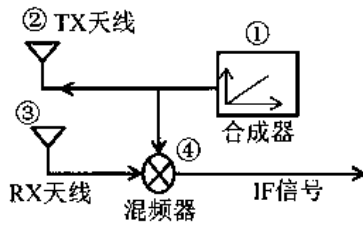


图3 FMCW 雷达工作原理图^[6]

通过其发射端 Tx 发射线性调频连续波信号, 其频域与时域图如下:

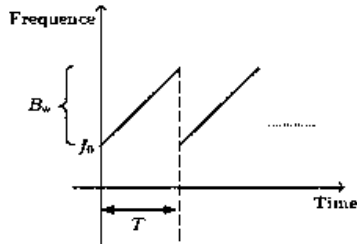


图4 调频连续波信号频域图

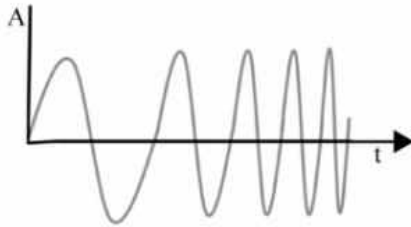


图5 调频连续波信号时域图

其信号函数 $s(t)$ 可以表达为:

$$s(t) = \exp \left[j \left(2 \pi f_0 t + \pi \frac{B_w}{T} t^2 \right) \right] \quad (3)$$

其中, f_0 为初始频率, B_w 为信号调制带宽, T 为波形周期。在本文中, 所有信号函数的振幅均被假设为 1 单位量。

当被检测对象与雷达信号发射器之间的距离为 R 时, 被检测对象接受并反射回波, 回波由雷达的接收端 Rx 接收, 而在通常情况下, 发射端 Tx 与接收端 Rx 之间的距离远小于雷达与被检测物体之间的距离, 所以在本文中该距离可以忽略不计, 即认为雷达的发射端与接收端在同一位置。其次, 本文中默认该生命信号检测系统的使用环境介质为空气, 故取电磁波的传播速度为 $C=3 \times 10^8 \text{m/s}$, 即光速。

由此可得雷达的接收端 Rx 所接收的信号函数可以表示为:

$$r(t) = \exp \left\{ j \left[2 \pi f_0 \left(t - \frac{2R}{c} \right) + \pi \frac{B_w}{T} \left(t - \frac{2R}{c} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

如上述图 3 所示, 雷达在接收到回波信号后将该信号与发射信号进行混频处理得到中频信号 f_{IF} ,

$$f_{IF}(t) = \exp \left[j \left(\frac{4 \pi R B_w}{TC} t + \frac{4 \pi R f_0}{C} - \frac{4 \pi R^2 B_w}{TC^2} \right) \right] \quad (5)$$

显然 $4 \pi R^2 B_w \ll C^2$, 故 $\frac{4 \pi R^2 B_w}{TC^2}$ 约等于 0, 可以忽略不计, 并设:

$$\begin{cases} f_b = \frac{2RB_w}{TC} \\ \Phi_b = \frac{4 \pi R}{\lambda} \end{cases} \quad (6)$$

则中频信号 f_{IF} 最终可以表达为:

$$f_{IF}(t) = \exp [j(2 \pi f_b t + \Phi_b)] \quad (7)$$

此即对于固定距离为 R 的物体所得的中频信号^[7]。

然而, 在实际的建模过程中, 人体的胸腔中心位置与检测雷达之间的距离并非固定不变, 而是呈现有规律的变化。根据医学上的观察与分析, 可以发现人体的心跳与呼吸均可视为有规律的振动伸缩模式或者扩张收缩模式, 所以, 在通常情况下, 可以将呼吸与心跳的信号模型简化为近似的正弦函数模型如下:

$$\begin{cases} D_r(\tau) = A_1 \sin(2 \pi f_r \tau) \\ D_h(\tau) = A_2 \sin(2 \pi f_h \tau) \end{cases} \quad (8)$$

即将呼吸与心跳混合信号表达为:

$$D(\tau) = D_r(\tau) + D_h(\tau) = A_1 \sin(2 \pi f_r \tau) + A_2 \sin(2 \pi f_h \tau) \quad (9)$$

其中 A_1 与 f_r 分别表示人体呼吸所产生的最大胸腔位移与呼吸频率, 通常 $3 \text{mm} < A_1 < 12 \text{mm}$, $0.2 \text{Hz} < f_r < 0.5 \text{Hz}$, 同时 A_2 与 f_h 分别表示人体心跳所产生的最大胸腔位移与心跳频率, 通常 $0.1 \text{mm} < A_2 < 0.5 \text{mm}$, $0.9 \text{Hz} < f_h < 2 \text{Hz}$ ^[3]。

所以, 当人体胸腔中心与雷达初始距离为 R_0 时, 在任一时间的距离可以表达为:

$$R(\tau) = R_0 + D(\tau) = R_0 + A_1 \sin(2 \pi f_r \tau) + A_2 \sin(2 \pi f_h \tau) \quad (10)$$

其中 $D(\tau)$ 如式 (9) 所示。

最终, 将式 (10) 代入式 (5) 及式 (7), 则可得最终中频信号模型表达该改写为:

$$\begin{aligned} f_{IF}(t) = & A_1 A_2 \exp \left\{ j \left[\frac{4 \pi B_w (R_0 + D(\tau))}{TC} t + \frac{4 \pi f_0 (R_0 + D(\tau))}{C} \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{4 \pi B_w (R_0 + D(\tau))^2}{TC^2} \right] \right\} \\ \approx & A_1 A_2 \exp [j(2 \pi f_b(\tau) t + \Phi_b(\tau))] \quad (11) \end{aligned}$$

$$\text{其中: } f_b(\tau) = \frac{2B_w(R_0+D(\tau))}{TC}, \Phi_b(\tau) = \frac{4\pi(R_0+D(\tau))}{\lambda}$$

5 应用探索

综上所述,通过采用 FMCW 雷达技术发射并接收回波信号,以及对该信号进行对比与处理,可以分离并解析出被检测人体目标的各项生理参数信息。而正如本文第一节中所述,我国的人口老龄化问题正面临着严峻考验,特别是老年人的居家监护问题,而将此技术应用于老年健康住宅中,对老龄人进行实时监护,可以在一定程度上解决此问题。

具体而言,将 FMCW 雷达装置装设于老年人的生活起居场所中并且连接至家庭个域网物联网,通过本文以上所述技术检测并分析出老龄人的生理信号参数后,再将所采集到的参数上传载入到数据传输网络系统。该网络系统可以分为两个部分,第一部分为近距离数据传输系统,主要功能是将雷达装置所采集到的生理信号参数数据传输到距离较近的小型网络节点,例如社区的医疗服务点,节点中配置基本的数据存储和处理服务器,可筛选出所收集到的异常数据并由社区医疗护理人员进行初步诊断与处理。该网络通常可以采用低功耗,窄带宽的 Zigbee、蓝牙等网络传输技术。第二部分是远距离数据传输系统,其功能是将小型网络节点的生理信号参数数据传输到远程医疗中心,该网络系统通常采用耗能较高但是容量更大的

WLAN、GPRS、4G 或者最新的 5G 技术,由此可以实现超远距离而且超大容量的数据传输。大量数据信息在远程医疗中心进行处理与筛查,同时将数据存入大型数据库系统,可以供医护人员进行数据对比与患者前期生理参数记录查阅使用。以此类推,通过上述系统的不断扩展延伸,可以将该生命信号检测系统覆盖至全市域甚至更大的范围。由此可以实现老年人的居家生命信号实时监测,达到更好的老年人居家监护效果^[2]。

6 总结

针对我国社会所面临的人口老龄化问题,本文提出了采用 FMCW 雷达技术来监测老龄人生理信号参数并且通过网络技术使之与远程医疗中心相连的方式,让老龄人在居家的情况下,各项生理指标也能得到实时监护,以此来推动老年健康住宅的发展。

本文对比分析了不同的雷达调制技术样本,并且建立了 FMCW 雷达技术检测人体生命信号参数的数学模型。然而,总体而言我国在雷达生命信号检测方面以及老年健康住宅方面的研究都刚刚处于起步阶段,仍然有许多方面需要继续研究与改进,例如在信号所携带的信息量、生命信号检测的精确度、更好的抗干扰性能等方面都还需要更多的学者进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 翟振武.新时代高质量发展的人口机遇和挑战[第七次全国人口普查公报解读][EB/OL]. 2021-05-12.
- [2] 陈宇翔.智慧城市背景下健康大数据系统搭建探索[J].大众标准化, 2021(12):16-18.
- [3] 陈惠明.基于 FMCW 毫米波雷达的生命信号检测技术研究[D].广州,广东工业大学, 2019.
- [4] 李斌,赵慧敏.一种用于人体生命信号检测的超宽带雷达设计[J].空间电子技术, 2012,9(04):41-46.
- [5] 王亮.基于超宽带雷达生命探测算法研究[D].杭州,浙江大学, 2017.
- [6] 王天润,苏中,刘宁.基于高频线性调频连续波的生命体征测量研究[J].系统仿真学报, 2018,30(11):4292-4297.
- [7] 吴志军,韦金宜,黄李波,白傑.基于调频连续波雷达的多目标生命体征实时检测[J].传感器与微系统, 2021,40(03):112-115+119.
- [8] 俞清扬,王飞.医疗建筑助力老年社群健康[J].时代建筑, 2020(05):7-8.
- [9] 卫兵,张磊,李斌,侯传宇.基于物联网的新型远程医疗监护系统的设计与研究[J].宿州学院学报, 2014,29(06):74-77.
- [10] 刘欢.基于网络大数据的智慧医疗一体化体系构建[J].网络安全技术与应用, 2020(10):147-148.
- [11] 刘文奎,马骏骁,傅海鹏.生命体征探测雷达系统的仿真研究[J].电波科学学报, 2021,36(01):156-162.
- [12] 张磊,田泽懿,唐春晖,高秀敏.生理参数监测技术及设备的研究进展[J].光学仪器, 2020,42(01):87-94.
- [13] HOU Haipin, QU Changwen, ZHOU Qiang, XIANG Yingchun. A Downward-looking Three-dimensional Imaging Method for Airborne FMCW SAR Based on Array Antennas[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011,24(01):55-64.
- [14] 钮靖,王秋红,张琪.基于物联网技术的远程智能医疗数据传输系统设计[J].电子世界, 2020(22):160-161.
- [15] 程方慧,泥瑾.信息化医疗系统的智慧医疗 App 应用设计研究[J].电子世界, 2020(24):174-175.
- [16] ZHANG Wenxin, LIU Xiaojun, CHEN Xiuwei, LIU Qing, FANG Guangyou. A NSZT Method for Frequency Estimation and Anti-noise Performance Analysis[J]. Chinese Journal of Electronics, 2018,27(03):648-657.

- [17] 刘璐瑶,张森,肖文栋. 基于小波分析和自相关计算的非接触式生理信号检测[J].工程科学学报, 2021,43(09):1206-1214.
- [18] 文乐,方晖,张兴敢.基于 MUSIC 算法的生命探测雷达信号处理方法[J].南京大学学报(自然科学), 2016,52(05):946-952.
- [19] 陈超,孟升卫,陈洁,方广有. 超宽带生命探测雷达研制及应用[J].电子测量技术, 2014,37(03):15-19+28.
- [20]Wei Deng,Haikun Jia,Baoyong Chi. Silicon-based FMCW signal generators: A review[J].Journal of Semiconductors,2020,41(11):8-15.

项目编号: 2021-4-259。

项目名称: 金华市科学技术局科学技术研究计划项目。